

0-769677

На правах рукописи

Балабин Юрий Васильевич



**ДИНАМИКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ  
ЛУЧЕЙ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА УРОВНЕ ЗЕМЛИ**

01.03.03 – физика Солнца

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Троицк - 2008

Работа выполнена в Полярном геофизическом институте Кольского  
научного центра РАН (ПГТИ КНЦ РАН), г. Апатиты

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Вашенюк Эдуард Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Тясто Марта Ильинична

доктора физико-математических наук  
Кокоулин Ростислав Павлович

Ведущая организация: НИИ Ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина

Защита диссертации состоится "28" апреля 2008 г. в 11<sup>00</sup>  
на заседании диссертационного совета Д 002.237.01 при Институте  
земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.  
Пушкова РАН по адресу: 142190, г. Троицк, Московская обл. ИЗМИРАН.  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН.

Автореферат разослан "28" марта

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000431892

Ученый секретарь диссертационного совета:

доктор физико-математических наук *Ю.М. Михайлов* Михайлов Ю.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию релятивистских солнечных протонов (РСП), частиц с энергией  $\geq 1$  ГэВ, которые представляют собой высокоэнергичную часть спектра солнечных космических лучей (СКЛ), на основе данных измерений наземными детекторами космических лучей. В работе рассматривается широкий круг вопросов, связанных с методикой определения характеристик первичных РСП из данных измерений нейтронными мониторами, а также физических процессов, ответственных за генерацию этих частиц во вспышках на Солнце и распространение в межпланетной среде.

### Актуальность темы.

Изучение высокоэнергичных частиц от Солнца и условий их генерации во вспышках представляет уникальную возможность экспериментального исследования механизмов ускорения частиц до релятивистских энергий в естественных условиях. Основным источником данных о релятивистских СКЛ остаются до настоящего времени остаются наблюдения на нейтронных мониторах. Получение из этих наблюдений характеристик первичных РСП за пределами атмосферы и магнитосферы Земли является непростой задачей и решение ее, в рамках настоящей работы является весьма актуальным.

Актуальность проблемы РСП состоит еще и в том, что в последние годы, в связи с началом регулярных наблюдений Солнца из космоса, произошел резкий скачок в понимании происходящих там процессов. В частности, выясняется та огромная роль, которую играют корональные выбросы вещества (КВВ) в процессах генерации СКЛ и модуляции их в межпланетной среде. Интенсивно исследуются и солнечные космические лучи с энергией от единиц до десятков МэВ по данным космических аппаратов. Прогресс в области энергий СКЛ в сотни и тысячи МэВ менее

значителен. Число событий здесь на 1-2 порядка меньше. Кроме того, существуют большие методические трудности в получении данных о первичных СКЛ из наблюдений на уровне Земли. Данная работа посвящена систематическому изучению релятивистских СКЛ и их динамики, что позволяет значительно расширить диапазон исследований с помощью энергичных частиц процессов на Солнце и в межпланетной среде.

### **Цель и задачи работы**

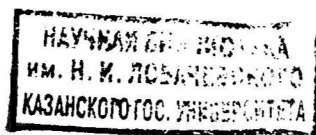
Целью работы являлось: создание эффективной методики определения параметров первичных СКЛ в релятивистской области энергий из данных наземных наблюдений, а также экспериментальное и модельное исследование физических процессов генерации этих частиц на Солнце и распространения в межпланетной среде.

В соответствии с целью работы ставились следующие задачи:

Определение характеристик первичных РСР за пределами магнитосферы и атмосферы Земли из данных наземных измерений нейтронными мониторами путем решения обратной задачи. Составной частью этой проблемы является определение асимптотических направлений прихода частиц путем расчета траекторий протонов в современных моделях магнитосферы.

С использованием разработанной методики определение характеристик РСР в крупных событиях СКЛ на уровне Земли, для которых имеется необходимый объем экспериментальных данных.

На основе полученных закономерностей о динамике спектров и анизотропии первичных РСР изучение физических процессов, связанных с генерацией этих частиц на Солнце и распространения в межпланетном магнитном поле.





**Научная новизна.**

1. Впервые проведено систематическое изучение событий СКЛ на уровне земли и получены характеристики первичных релятивистских солнечных протонов (РСП), исследована их динамика в 14 крупных событиях. Характеристики РСП получены из данных мировой сети нейтронных мониторов с использованием оригинальной авторской методики включающей решение обратной задачи и траекторные расчеты космических лучей в современных моделях магнитосферы.
2. Впервые на основе систематического изучения в 14 событиях СКЛ на уровне Земли показано существование в потоке РСП двух популяций частиц, быстрой и запаздывающей (медленной), инжекция которых с Солнца происходит во время импульсной и постэруптивной стадий вспышечного возмущения, соответственно. Быстрая компонента (БК) имеет импульсообразный временной профиль и экспоненциальный энергетический спектр. Медленная компонента (МК) обладает плавным временным профилем и степенным энергетическим спектром.
3. Показано, что возможным механизмом генерации быстрой компоненты РСП может быть ускорение в электрических полях, возникающих при магнитном пересоединении в корональных токовых слоях.
4. Показано, что вероятным механизмом генерации медленной компоненты, может быть стохастическое ускорение в турбулентной плазме вспышечного выброса или ускорение на ударной волне в солнечной короне.
5. Впервые на основе анализа динамики питч-угловых распределений РСП в событии 28.10.2003 г. показано, что распространение этих частиц от места вспышки на Солнце до Земли происходило в петлевой структуре ММП, образованной корональным выбросом вещества от предыдущей вспышки.

### **Защищаемые положения и результаты.**

1. Разработанная автором методика определения характеристик РСП за пределами магнитосферы и атмосферы Земли из данных наземных измерений нейтронными мониторами методом решения обратной задачи.
2. Обнаруженные в результате исследования 14 событий РСП две популяции частиц, быстрая и медленная, отличающиеся видом энергетических спектров и питч-угловых распределений, инжекция которых с Солнца происходит во время импульсной и постэруптивной стадий вспышечного возмущения, соответственно.
3. Распространение РСП в петлеобразных структурах ММП, установленное на основе изучения динамики питч-угловых распределений.

### **Научный интерес**

Полученные в диссертации данные о динамике потоков солнечных космических лучей в 14 крупных событиях периода 1956-2006 гг. представляют интерес с научной точки зрения. Эти данные могут быть использованы для экспериментальной проверки теоретических и расчетных моделей физических процессов на Солнце, в межпланетном пространстве, магнитосфере и атмосфере Земли, которые идут в присутствии релятивистских СКЛ. В частности, полученные в диссертации данные могут быть использованы для уточнения моделей ускорения частиц до релятивистских энергий во вспышках на Солнце, распространения в межпланетном магнитном поле, проникновения в магнитосферу Земли и воздействия на ее атмосферу.

### **Практическая значимость работы**

Разработанная в диссертации методика получения характеристик первичных СКЛ высокой энергии по измерениям нейтронными мониторами на уровне земли представляет и практический интерес. Полученные в диссертации характеристики релятивистских СКЛ позволяют проследить их динамику в 14 крупнейших событиях за полувековой период 1956-2006 гг., что может быть использовано для прогноза радиационной опасности в космическом пространстве и на трансполярных авиатрассах, в том числе и для оценки «наихудшего случая».

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на Всероссийских конференциях по космическим лучам в 2004 и 2006 гг., на Международных конференциях по космическим лучам в г. Цукуба (Япония) /2003/, г. Пуна (Индия) /2005/, г. Мерида (Мексика) /2007/, Ассамблеях КОСПАР г. Париж (Франция) /2004/, г. Пекин (КНР) /2006/, на XXVI-XXXI ежегодных семинарах «Физика авроральных явлений» в г. Апатиты (Россия) 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, 11 из которых в ведущих реферируемых научных изданиях.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит введения, трех глав, заключения списка литературы. Общий объем - 140 страниц, в том числе: 48 рисунков, 29 таблиц, список литературы включает 98 наименований.

### **Личный вклад автора**

Личное участие Балабина Ю.В. в получении научных результатов выразилось в создании соответствующей современному мировому уровню методики получения характеристик первичных СКЛ из данных измерений нейтронными мониторами на уровне Земли. Им лично предложены алгоритмы решения задач, написаны пакеты программ, разработаны методы обработки первичных экспериментальных данных. Диссертантом лично выполнен сбор данных мировой сети нейтронных мониторов, их обработка и приведение к стандартному виду для 14 событий, произошедших за полувековой период с 1956 по 2006 гг.

Диссертанту принадлежит лидирующее авторство в выборе методов и решении поставленных задач научного исследования. Все результаты по теме диссертации получены лично автором или при его активном участии. Кроме научной работы, Балабин Ю.В. принимает деятельное участие в обеспечении работоспособности нейтронных мониторов Полярного геофизического института в Апатитах и на арх. Шпицберген. При его личном участии в 2003 г. был установлен и пущен в эксплуатацию первый на Шпицбергене нейтронный монитор в obs. Баренцбург, а в 2006-2007 гг. проведена модернизация его аппаратурного комплекса. В диссертации использованы данные измерения нейтронным монитором на Шпицбергене в событиях с релятивистскими СКЛ 2003-2006 гг.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы. Кратко описано содержание глав.

**В 1-й главе** рассматриваются методические вопросы, связанные с обработкой и анализом данных, получаемых с помощью наземных детекторов космических лучей.

Приводится общая сводка данных о событиях СКЛ на уровне Земли, в которых регистрируются релятивистские солнечные протоны (РСП), их основные характеристики.

Рассмотрена методика обработки данных нейтронных мониторов в событиях РСП, существенной частью которой является коррекция на барометрический эффект, проводимая для устранения вариаций интенсивности нейтронов, связанных с изменением атмосферного давления. Особенностью этой коррекции является учет разницы в длинах поглощения  $\lambda$  нейтронов в атмосфере для ГКЛ и СКЛ. Величина  $\lambda$  (интервал давления, на котором интенсивность нейтронов падает в  $e$  раз) зависит от спектра первичных КЛ и имеет различное значение для нейтронов, генерированных в атмосфере под действием ГКЛ -  $\lambda_g$  и СКЛ -  $\lambda_r$ . Типичными значениями являются:  $\lambda_g \sim 140$  г/см<sup>2</sup> и  $\lambda_r \sim 100$  г/см<sup>2</sup>, хотя в каждом конкретном случае эти значения могут меняться.

Описана методика определения характеристик РСП за пределами магнитосферы Земли по данным наземных возрастаний, регистрируемых сетью станций нейтронных мониторов: интенсивность и вид энергетического спектра, направление оси анизотропии, форма питч-углового распределения. Эти параметры определяются методом решения обратной задачи (метод оптимизации) при сравнении результатов расчетных откликов нейтронных мониторов с наблюдаемыми возрастаниями на станциях мировой сети. Существенную роль в этом методе играет определение асимптотических конусов приема для станций нейтронных мониторов с помощью расчета траекторий космических лучей в модельном геомагнитном поле. Расчет траекторий проводится с помощью интегрирования уравнений движения частицы с массой протона, но обратного знака, выпущенной вертикально от границы атмосферы, над данной станцией. При расчетах использовалась современная модель магнитосферы Цыганенко 2001 г. Существенным шагом вперед по

сравнению с прошлыми исследованиями в данной области было внедрение в практику расчетов траекторий частиц, падающих на детектор под различными азимутальными и вертикальными углами. Это существенно усложнило решение обратной задачи, однако позволило улучшить точность расчета откликов нейтронных мониторов в области средних и больших жесткостей.

Далее в 1-й главе проводится описание предложенных автором методов решения обратной задачи. С помощью объемных математических преобразований сведены к минимуму число искомых переменных и условных уравнений.

Предложенный в работе алгоритм решения обратной задачи включает три различных модели потока РСП: однонаправленный, двунаправленный и с двумя независимыми потоками. Этими моделями удастся описать сложные случаи, ранее не поддававшиеся решению. На классических событиях выполнена проверка сходимости решений, полученных различными моделями; показано, что все они сходятся к одному решению.

На основе расчетов дифференциальных откликов нейтронных мониторов (НМ) на поток РСП показано принципиальное отличие откликов на степенной и экспоненциальный спектры. Различия в видах спектров ведут к существенным изменениям положения эффективного интервала углов приема на асимптотических конусах. Это показывает, что экспоненциальный и степенной спектры РСП производят принципиально различные эффекты возрастания на нейтронных мониторах мировой сети. Выполнена проверка устойчивости решений обратной задачи путем введения случайного сигнала погрешности в исходные данные. Показана высокая устойчивость решений обратной задачи.

**Вторая глава** посвящена систематическому изучению релятивистских солнечных протонов и их динамики на основе модельного

исследования 14 крупных событий СКЛ на уровне Земли. Конкретно, с помощью описанной в гл.1 методики проведена подготовка данных нейтронных мониторов мировой сети и проведено решение обратной задачи в 14 событиях с РСП, зарегистрированных в период с 1956 по 2006 г. Главным критерием при отборе событий было достаточное число станций нейтронных мониторов и, там где имелись, мюонных телескопов. Для получения устойчивого решения обратной задачи их число должно быть не менее 25-30.

Для каждого события определялись основные характеристики потока РСП в межпланетном пространстве: жесткостной спектр, направление оси анизотропии и питч-угловое распределение. Указанные характеристики определялись в последовательные моменты времени, что позволило исследовать динамику потоков РСП в течение каждого данного события.

Полученные спектры РСП сравнивались с доступными данными прямых измерений солнечных протонов в смежных энергетических интервалах, полученных на шарах-зондах и космических аппаратах. Демонстрируется устойчивое соответствие данных прямых измерений и спектров, полученных из наземных измерений при решении обратной задачи.

В результате систематического исследования спектров РСП обнаружено существование двух популяций частиц, быстрой и медленной, инжекция которых с Солнца происходит во время импульсной и постэруптивной стадий вспышечного возмущения, соответственно. Быстрая компонента (БК) имеет импульсообразный временной профиль и экспоненциальный энергетический спектр. Медленная компонента (МК) обладает плавным временным профилем и степенным энергетическим спектром.

**3-я глава** посвящена изучению свойств источника релятивистских протонов на Солнце, возможных механизмов их ускорения и распространения в межпланетном магнитном поле, на основе полученных в гл.2 характеристик РСП и с учетом современных представлений об активных процессах на Солнце и в межпланетной среде: корональных выбросах вещества (КВВ), ударных волн, формирования петлеобразных структур в ММП и пр.

Рассмотрены свидетельства тесной связи процессов генерации релятивистских протонов во вспышечных возмущениях на Солнце с крупномасштабными активными процессами в солнечной короне. Показано, что время генерации первых релятивистских частиц на Солнце совпадает с началом роста радиоизлучения в широкой области частот. Этот момент близок по времени к началу радиовсплеска II типа.

По времени запаздывания начала возрастания у Земли относительно радиовсплеска II типа показано существование 2-х компонент РСП. Быстрая компонента (БК) начинает испускаться с Солнца в пределах 5-10 мин. от начала радиовсплеска II типа. Начало инъекции медленной компоненты (МК) запаздывает относительно БК на 15-40 мин. Разделение на быструю и запаздывающую компоненты дает также исследование зависимости полного пути, пройденного частицами от их скорости.

Быстрой и медленной компонентам РСП соответствуют два вида спектров, найденных в гл.2 при решении обратной задачи. Именно, быстрой компоненте соответствует экспоненциальный энергетический спектр, характерный для механизма ускорения в электрическом поле, возникающем в области магнитного пересоединения. Модельные расчеты, воспроизводящие комбинацию электрического и магнитного полей в области магнитного пересоединения, дают расчетный спектр частиц экспоненциальной формы, подобный спектру БК, полученному из экспериментальных данных.



Медленная компонента имеет степенной энергетический спектр. Вероятным механизмом генерации МК может быть стохастическое ускорение МГД турбулентностью во вспышечной плазме. Указанный факт подтверждается совпадением формы спектра, полученного методами оптимизации из экспериментальных данных и расчетного спектра в модели стохастического ускорения.

Гигантские возрастания  $\sim 5000\%$  на нейтронных мониторах в крупнейших за всю историю наблюдения СКЛ событиях (23.02.1956 г. и 20.01.2005 г.) были вызваны быстрой компонентой, имевшей сильную анизотропию и экспоненциальный энергетический спектр. Запоздавающая компонента, имевшая степенной энергетический спектр, обусловила умеренное возрастание на большинстве станций мировой сети. Показано, что вследствие специфической энергетической зависимости атмосферных функций связи нейтронного монитора, только экспоненциальный спектр мог вызвать такое большое возрастание в обоих случаях.

На основе изучения динамики анизотропии иpitch-угловых распределений РСП исследуется распространение этих частиц в межпланетном магнитном поле. Наряду с рассеянием на магнитных неоднородностях и магнитной фокусировкой, исследован важный для практики случай распространения в петлеобразных магнитных структурах. Показано, что в событии 28.10.2003 г. релятивистские протоны пришли к Земле от вспышки в восточной части солнечного диска вдоль магнитной петлевой структуры, вытянутой из активной области корональным выбросом вещества от предыдущей вспышки на Солнце.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана методика определения параметров релятивистских солнечных протонов (РСП) за пределами атмосферы и магнитосферы

- Земли из данных наземных измерений нейтронными мониторами путем решения обратной задачи. Методика содержит весь цикл от обработки первичных данных (профили возрастных на станциях сети НМ) до получения характеристик РСП за пределами магнитосферы и атмосферы Земли в последовательные моменты времени.
2. Разработаны алгоритмы и пакеты программ для расчета траекторий космических лучей в современной модели магнитосферы Цыганенко-2001 г., с помощью которой вычисляются асимптотические конусы приема для частиц падающих на детектор как из вертикали, так и под различными азимутальными и зенитными углами.
  3. С помощью методики п.1 и п.2 впервые проведено систематическое исследование параметров РСП и исследована их динамика в 14 крупных событиях СКЛ на уровне Земли, которые произошли в период с 1956 по 2006 гг.
  4. На основе систематического изучения динамики РСП в 15 указанных событиях, показано существование двух популяций частиц: быстрой и медленной, инжекция которых с Солнца происходит во время импульсной и постэруптивной стадий вспышечного возмущения, соответственно. Быстрая компонента (БК) имеет импульсообразный временной профиль и экспоненциальный энергетический спектр. Она начинает испускаться с Солнца через 5-10 мин после начала радиовсплеска II типа, обозначающего максимум импульсной фазы вспышки. Медленная компонента (МК) имеет затянутый временной профиль и степенной энергетический спектр. Начало ее инжекции с Солнца запаздывает, в среднем, на 15-40 минут относительно быстрой компоненты.
  5. Проведены модельные расчеты формирования энергетического спектра частиц, ускоренных электрическим полем в области магнитного пересоединения. Рассчитывались траектории протонов в конфигурации

электрического и магнитного полей, воспроизводящей область магнитного пересоединения и фиксировалась их энергия при покидании области ускорения. Суммарный спектр частиц имеет экспоненциальную форму, подобную спектру быстрой компоненты, полученному из экспериментальных данных.

6. Показано, что вероятным механизмом генерации медленной компоненты может быть стохастическое ускорение МГД турбулентностью во вспышечной плазме. Указанный факт подтверждается совпадением степенной формы спектра, полученного методами оптимизации из экспериментальных данных и расчетного спектра в модели стохастического ускорения.
7. Показано, что гигантское возрастание  $\sim 5000\%$  на нейтронных мониторах в крупнейших событиях РСП 23.02.1956 г. и 20.01.2005 г. было вызвано быстрой компонентой, имевшей сильную анизотропию и экспоненциальный энергетический спектр. Запоздывающая компонента, имевшая степенной энергетический спектр, обусловила умеренное возрастание на большинстве станций мировой сети. Показано, что вследствие специфической энергетической зависимости атмосферных функций связи нейтронного монитора, только экспоненциальный спектр мог вызвать такое большое возрастание в обоих случаях.
8. На основе изучения динамики анизотропии и пичч-угловых распределений РСП в событии 28.10.2003 г. показано, что релятивистские протоны пришли к Земле от вспышки в восточной части солнечного диска вдоль магнитной петлевой структуры, вытянутой из активной области корональным выбросом вещества от предыдущей вспышки на Солнце.

**Результаты, составившие основу диссертационной работы, изложены в следующих публикациях**

1. Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Мингалев О.В., Подгорный А.И., Подгорный И.М. Спектр солнечных космических лучей: данные наблюдений и модельных расчетов // Астрон. Ж. 2005. Т.82, С. 940-949.
2. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Relativistic solar proton dynamics in large GLEs of 23 solar cycle // Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic ray Conf. Tsukuba, Japan, July 31-August 7, 2003, Tsukuba, Japan. 2003. V.6. P.3401-3404.
3. Вашенюк Э.В., Мирошнichenко Л.И., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. Динамика релятивистских СКЛ в событиях октября-ноября 2003 г.: Модельные исследования // Изв. РАН. сер. физ. 2005.Т.69, №6. С. 808-811.
4. Miroshnichenko L.I., Klein K.-L., Trottet G., Lantos P., Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Relativistic Nucleon and Electron Production in the 2003 October 28 Solar Event // J.Geophys.Res. 2005. Vol. 110. A09S08, doi:10292004JA010936
5. Miroshnichenko L.I., Klein K.-L., Trottet G., Lantos P., Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V. Electron acceleration and relativistic nucleon production in the October, 2003 solar event // Adv. Space Res. 2005. V.35. P.1864-1870.
6. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Miroshnichenko L.I., Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Regularities in the relativistic solar proton spectra formation // Proc. 28<sup>th</sup> Annual Apatity Seminar, 1-4 March, 2005. Kola Science Center RAS. 2005. P.145-148.
7. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Karpov S.N., Super GLE of 20 January, 2005 // Proc. 28<sup>th</sup> Annual Apatity Seminar, 1-4 March, 2005. Kola Science Center RAS. 2005. P. 149-153.
8. Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Карпов С.Н. Релятивистские солнечные протоны в событии 20 января 2005 г.

Модельные исследования // Геомагнетизм и Аэрономия 2006, Т46, № 4, С.1-7.

9. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Miroshnichenko L.I. Some features of relativistic particles at the Sun in the solar cycles 21-23 // Adv. Space Res. 2006. V. 38 . P 411-417.

10. Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V. Relativistic proton production at the Sun in the October 28<sup>th</sup>, 2003 solar event // Adv. Space Res. 2006. V.38. Issue 3. P. 418-424.

11. Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Любчик А.А. Распространение СКЛ в петлеобразных структурах ММП // Изв. РАН сер. физ. 2007. Т.71, №7. С.965-967.

12. Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Мирошниченко Л.И. Характеристики релятивистских СКЛ в крупных событиях на уровне Земли // Изв. РАН сер. физ. 2007. Т.71, №7. С.968-971.

13. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Miroshnichenko L.I., Relativistic solar protons in the GLE of 23 February 1956: New study // Adv. Space Res. 2008. V.41. P. 926–935.

14. Perez-Peraza J., Vashenyuk E.V., Gallegos-Cruz A., Balabin Yu.V., Miroshnichenko L.I., Relativistic proton production at the Sun in the January 20, 2005 event // Adv. Space Res. 2008. V.41. P. 947–954.

15. Вашенюк Э.В., Гвоздевский Б.Б., Балабин Ю.В., Григорьев В.Ф., Шадрин С.А. Исследования космических лучей на арх. Шпицберген //сб. Арктика и Антарктика изд. Госгидромет, 2005, вып.4 (38) С.5-15.

### ***Благодарности***

Автор выражает искреннюю глубокую признательность научному руководителю Вашенюку Эдуарду Владимировичу за постановку задачи, ценные советы, помощь в организационных вопросах и моральную поддержку. Автор также благодарит Гвоздевского Б.Б. за полезные дискуссии по теме диссертации.

Автор сердечно благодарит Мирошниченко Л.И., Подгорного И.М., Подгорного А.И., Базилевскую Г.А., Гущину Р.Т., Янке В.Г., Белова А.В., Ерошенко Е.А., способствовавших написанию этой работы.

Особую благодарность автор высказывает Янковскому Игорю Викторовичу (г. Нальчик, Высокогорная экологическая обсерватория) за консультации по программированию на C++ и неиссякаемое терпение при этом.

Подписано в печать 25.03.2008 г.  
Формат 60х84/16. Печ. л. 1.  
Тираж 100 экз. Заказ 1347.

Издательство «Тровант»  
ЛР 071961 от 01.09.1999 г.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии издательства «Тровант».  
142191, г. Троицк Московской обл., м-н «В», д. 52.  
Тел. (495) 334-09-67, (4967) 50-21-81  
E-mail: [trovant@ntk.ru](mailto:trovant@ntk.ru), <http://www.trovant.ru/>

